

# 区域供冷系统中冷冻水输送管线的优化设计<sup>\*</sup>

刘金平<sup>1</sup> 杜艳国<sup>1</sup> 陈志勤<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640

2. 华南理工大学 工业装备与控制工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 建立了确定区域供冷系统冷冻水输送管线最优水流速度和保温层最优厚度的优化模型, 其目标函数为系统的年度费用, 由冷冻水二级泵的年运行费用、冷冻水输送管线冷量损失费用、二级泵功耗导致的冷水温升所产生的费用、冷冻水二级泵的折旧和维修费用以及冷冻水输送管线折旧和维修费用 5 部分组成. 考虑全年变负荷运行的特点, 在部分负荷时假设冷冻水的供回水温差不变, 采用变频泵调节流量. 通过实例计算, 得到以下结论: 对于区域供冷系统, 存在最优的水流速度和保温层厚度; 冷水输送距离对最优水流速度和保温层最优厚度没有影响; 最优水流速度随电价升高而降低, 随设计冷负荷增大而升高; 保温层最优厚度随电价升高而增加, 随设计冷负荷的增大而稍有增加.

**关键词:** 区域供冷系统; 管线; 优化设计; 变冷负荷

中图分类号: TU 83.3

文献标识码: A

区域供冷系统是利用集中设置的大型冷冻站向一定范围内的需冷单位提供冷量的供冷方式. 由于区域供冷系统在节能、环保和运行管理等方面的优势, 许多国家和地区特别是欧、美、日等发达国家对其进行了相应的研究并得到了较广泛的应用<sup>[1, 2]</sup>, 如冷负荷预测研究<sup>[3]</sup>以及区域供冷系统优化控制的研究<sup>[4]</sup>. 近年来区域供冷系统在我国也呈现出明显的发展趋势<sup>[5]</sup>.

区域供冷系统一般是将冷冻水送至用户. 随着区域供冷系统供冷量的增大, 供冷距离增长, 冷冻水二级泵及冷冻水输送管线的投资和能耗费用增大, 对区域供冷系统的投资和运行费用有显著影响, 因此有必要对其进行研究. 本文拟建立考虑变负荷特性的冷冻水二次泵及冷冻水输送管线的优化设计模

型, 通过实例计算, 分析电价和冷负荷对最佳水流速度及管线保温层最佳厚度的影响.

## 1 优化模型的建立

根据区域供冷系统的工作原理和热经济学原理<sup>[6]</sup>, 进行冷冻水输送管线优化设计, 以经济效益最优为判据, 即以冷冻水系统的年度费用最小为优化的目标, 作为目标函数的冷冻水系统的年度费用由 5 部分组成: 冷冻水泵的年运行费用、管道的折旧和维修费用、冷冻水泵的折旧费用、输水管道冷量损失费用以及水泵功耗导致的水温升高产生的费用.

本文所讨论的区域供冷系统是在中央制冷站制取冷冻水, 冷冻水沿管路由泵输送到用户, 然后再返回制冷系统.

假设冷冻水输送系统采用变频调速泵进行调节, 在不同冷负荷时, 通过调节冷冻水泵的流量, 保证送水温度和回水温度不变. 在设计时若选用较高的冷冻水流速, 则可以减小输送管路的直径, 减少设备的初投资; 但冷冻水流速增大会导致流动阻力增大, 水泵的功耗增大, 故存在最佳的输水速度和输水管径.

收稿日期: 2004-02-17

\*基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (G2000026308)

作者简介: 刘金平(1962-), 男, 博士, 副教授, 主要从事制冷空调系统的优化设计与运行方面的研究. E-mail: mpjpliu@scut.edu.cn

### 1.1 流动阻力的计算

当管内流体的雷诺数  $Re > 10\ 000$ , 流动处于阻力平方区, 沿程阻力摩擦系数  $\xi$  按式(1)计算:

$$\xi = 0.11 \left[ \frac{K}{d} \right]^{0.25} \quad (1)$$

式中:  $\xi$  为沿程阻力系数;  $K$  为钢管当量粗糙度, m;  $d$  为输水管内径, m.

取局部阻力损失为沿程阻力损失的 20%, 某一负荷时管线总阻力损失为

$$\Delta p_j = 1.2 \xi \cdot \frac{1}{d} \rho \cdot \frac{v_j^2}{2} \quad (2)$$

式中:  $\Delta p_j$  为冷冻水管线总阻力损失, Pa;  $v_j$  为某一供冷负荷时冷冻水的流速, m/s;  $\rho$  为水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $l$  为冷冻水输送管线的长度, m.

### 1.2 水泵的年耗电费用

某一负荷时冷冻水泵的耗电功率为

$$P_{\text{pump}j} = \Delta p_j \cdot Q_{vj} / \eta \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{pump}j}$  为冷冻水泵的耗电功率, W;  $\eta$  为水泵效率, 为简化计算, 在本文中取  $\eta = 0.65$ ;  $Q_{vj}$  为冷冻水的体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

则水泵的年耗电费用为

$$C_e = \sum P_{\text{pump}j} \cdot t_j \cdot c_e \times 10^{-7} \quad (4)$$

式中:  $C_e$  为水泵的年耗电的费用, 万元/a;  $t_j$  为对应某一供冷负荷流速为  $w_j$  的时间, h/a;  $c_e$  为用电单价, 元/(kWh).

### 1.3 输送管线的投资

冷冻水的输送管线有两种方式: 直埋式和沟管式, 对于直埋式管道, 其输送管线的投资由管道造价、保温材料、保护材料和直埋土建 4 部分构成.

1m 管材的造价:

$$C_p = c_p \pi \cdot \delta \cdot \gamma \cdot (d + \delta) \quad (5)$$

式中:  $C_p$  为 1 m 管材的造价, 元/m;  $\gamma$  为钢管密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $c_p$  为钢管价格, 元/t;  $\delta$  为管壁厚度, m, 与管内径的关系如下式:

$$\delta = 0.001\ 42 + 0.019\ 9d \quad (6)$$

1 m 管道所用保温材料的费用:

$$C_{\text{th}} = c_{\text{th}} \pi \cdot \hat{q} (d + 2\delta + \hat{q}) \quad (7)$$

式中:  $C_{\text{th}}$  为 1m 管道所用保温材料的费用, 元/m;  $\hat{q}$  为冷冻水管保温层的厚度, m;  $c_{\text{th}}$  为保温材料的价格, 元/ $\text{m}^3$ .

1m 管道的保护层的费用为

$$C_{\text{pr}} = c_{\text{pr}} \pi (d + 2\delta + 2\hat{q}) \quad (8)$$

式中:  $C_{\text{pr}}$  为 1m 管道的保护层的费用, 元/m;  $c_{\text{pr}}$  为保护层材料的价格, 元/ $\text{m}^2$ .

根据实际工程的造价拟和出 1m 管道土建费用与直径的函数关系:

$$C_{\text{con}} = c_{\text{con}} \pi (d + 2\delta + 2\hat{q}) \quad (9)$$

式中:  $c_{\text{con}}$  为拟和系数.

由以上可得管路的总的投资费用为

$$C_{\text{pi}} = (C_p + C_{\text{th}} + C_{\text{pr}} + C_{\text{con}}) \cdot l \quad (10)$$

则管道的年折旧费为:

$$\Delta C_{\text{pi}} = \beta_p (C_p + C_{\text{th}} + C_{\text{pr}} + C_{\text{con}}) \cdot l / 10\ 000 \quad (11)$$

式中:  $\beta_p$  为管道的年折旧费率.

### 1.4 水泵的投资

水泵的价格可简化为设计功率的线性函数, 根据有关生产厂家提供的数据可拟和出下式:

$$C_{\text{pu}} = A_1 + B_1 \cdot P_{\text{pu}0} = A_1 + B_1 \cdot A_2 \cdot P_{\text{pu}} \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{pu}0}$  为水泵设计功率, kW;  $A_1, B_1$  为拟和系数;  $A_2$  为水泵设计功率的冗余值;  $P_{\text{pu}}$  为水泵的实际功率, kW.

水泵的年折旧费为

$$\Delta C_{\text{pu}} = \beta_{\text{pu}} C_{\text{pu}} \quad (13)$$

式中:  $\beta_{\text{pu}}$  为水泵的年折旧费率.

### 1.5 输水管道冷量损失费用

由传热学公式得输水管道冷量损失  $\Delta Q$  为

$$\Delta Q = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot l \cdot t_0}{\ln \frac{d+2\delta+2\hat{q}}{d+2\delta}} (2\theta_s - \theta_{\text{chs}} - \theta_{\text{chr}}) \quad (14)$$

式中:  $\lambda$  为保温材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\theta_{\text{chs}}$  为输水管道内冷冻水供水的平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta_{\text{chr}}$  为输水管道内冷冻水回水的平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta_s$  为输水管道外土壤的平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_0$  为供冷系统运行期间的总小时数, h.

输水管道冷量损失折算为耗电量损失费用为

$$C_{\Delta Q} = c_e \cdot \Delta Q / (10^7 \times C_{\text{OPs}}) \quad (15)$$

式中:  $C_{\text{OPs}}$  为系统的 COP 值.

### 1.6 水泵功耗导致的冷水温升的费用

水泵功耗是为了克服冷冻水在输水管道中的摩擦阻力, 这部分能量转化为热量使得冷冻水温度升高, 即系统需多耗电制取相应的冷量, 由能量平衡得水泵功耗导致的冷水温升的费用为

$$C_{\Delta P} = c_e \cdot \left[ \sum P_{\text{pump}j} \cdot t_j \right] / (10^7 \times C_{\text{OPs}}) \quad (16)$$

### 1.7 优化模型的目标函数

目标函数为系统的年度费用, 由 5 部分组成: 冷

冻水泵的年运行费用、管道的折旧和维修费用、冷冻水泵的折旧费用、输水管道冷量损失的费用以及水泵功耗导致的冷水温升所产生的费用,即

$$\min C_{\text{total}} = C_e + \Delta C_{\text{pi}} + \Delta C_{\text{pu}} + C_{\Delta Q} + C_{\Delta P} \quad (17)$$

### 1.8 约束条件

系统的冷负荷为定值,即

$$Q_0 = \frac{1}{4} \pi d^2 \rho v_0 c_p (\theta_2 - \theta_1) / \zeta \quad (18)$$

式中:  $\theta_1$  为设计工况冷冻水供水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta_2$  为设计工况冷冻水回水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\zeta$  为冷水温度备用系数。

考虑到长距离冷量输送调节的滞后性, 输送的冷水温度有较大的备用即在用户侧负荷增加时可通过调节三次泵的流量满足用户侧负荷增加的要求, 取  $\zeta = 1.3$ , 系统中的优化变量为冷冻水流速  $v_0$  和冷冻水管保温层厚度  $\delta$ 。

### 1.9 优化模型的求解

本文所建立的模型为一有约束的双变量线性优化问题, 利用 Microsoft Excel 的“规划求解”宏程序, 即可进行本问题的优化计算, 得出相应的计算结果。

## 2 实例计算

以广州地区某一区域供冷系统为例, 进行计算分析, 该区域供冷总时数为 3 360 h, 供冷系统的负荷率和供冷时间<sup>[9]</sup>见表 1, 优化模型中的系数及相应经济性参数见表 2。

表 1 负荷率和供冷时间

Table 1 Load ratio and corresponding time

负荷率 / %	供冷时间 / h	占供冷总时数的比例 / %	负荷率 / %	供冷时间 / h	占供冷总时数的比例 / %
100	269	8	60	336	10
90	302	9	50	538	16
80	302	9	40	672	20
70	336	10	30	605	18

表 2 优化模型中的参数

Table 2 Coefficients of the optimal model

参数	$K/m$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$c_p/(元 \cdot t^{-1})$	$c_{th}/(元 \cdot m^{-3})$
数值	0.000 24	1 000	6 500	680
参数	$c_{pr}/(元 \cdot m^{-2})$	$c_{con}$	$A_1$	$B_1$
数值	25	96.4	12.54	0.395
参数	$A_2$	$\gamma/(t \cdot m^{-3})$	$C/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	$\theta_{dr}/^{\circ}\text{C}$
数值	1.38	7.8	4.18	13
参数	$\theta_{dr}/^{\circ}\text{C}$	$\theta_s/^{\circ}\text{C}$	$C_{ops}$	$\beta_p$
数值	13	25	4.2	0.15
参数	$\beta_{pump}$	$t_0/h$	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	
数值	0.1	6 000	0.06	

针对供冷距离分别为 250, 500, 750, 1 000, 1 500 m; 电价分别为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 元/(kWh)进行了不同设计供冷量 5 000, 10 000, 20 000, 30 000, 40 000, 50 000 kW 的计算, 所得结果见图 1~4 及表 3。其中图 1 的计算参数是: 电价为 0.6 元/(kWh), 冷负荷为 40 000 kW, 冷冻水输送距离为 1 000 m; 图 2 的计算参数是: 电价为 0.6 元/(kWh), 冷负荷为 20 000 kW, 冷冻水输送距离为 1 000 m。

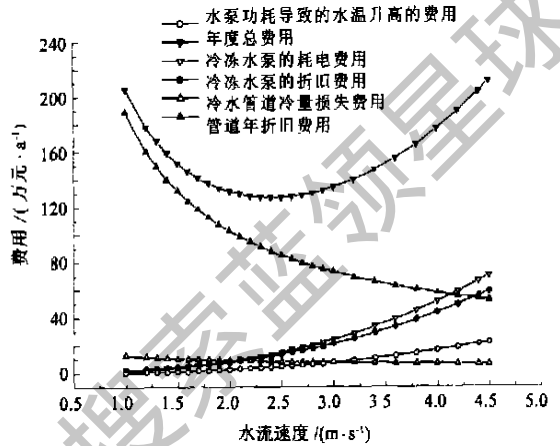


图 1 年度运行费用随冷冻水流速变化曲线

Fig.1 The changing curves of velocity of chilled water with the annual total cost

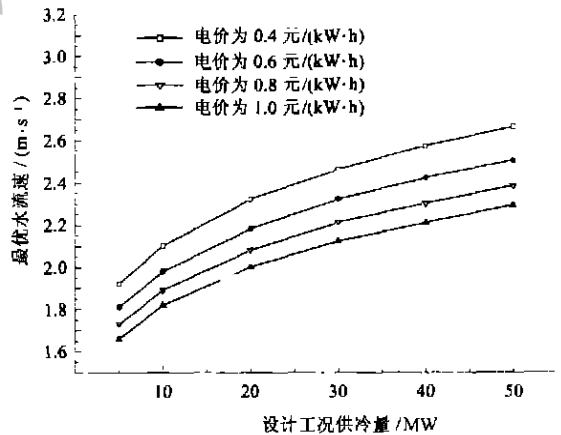


图 2 电价及冷负荷对最优流速的影响

Fig.2 The effects of the electric power price and load ratio on the optimal velocity of chilled water

表 3 不同的输送距离对应的年度费用

Table 3 Distance and corresponding the annual total cost

冷冻水输送距离/m	最优的冷冻水流速/(m·s <sup>-1</sup> )	最优的保温层厚度/m	年度费用/(万元·a <sup>-1</sup> )
250	2.18	0.087 3	20.68
500	2.18	0.087 3	40.11
750	2.18	0.087 3	59.53
1 000	2.18	0.087 3	78.96
1 500	2.18	0.087 3	117.81

表 3 的计算参数是: 电价为 0.6 元/(kW·h), 冷负荷为 40 000 kW. 图 3, 4 的计算参数是: 电价为 0.6 元/(kW·h), 冷负荷为 2 000 kW, 冷冻水输送距离为 1 000 m.

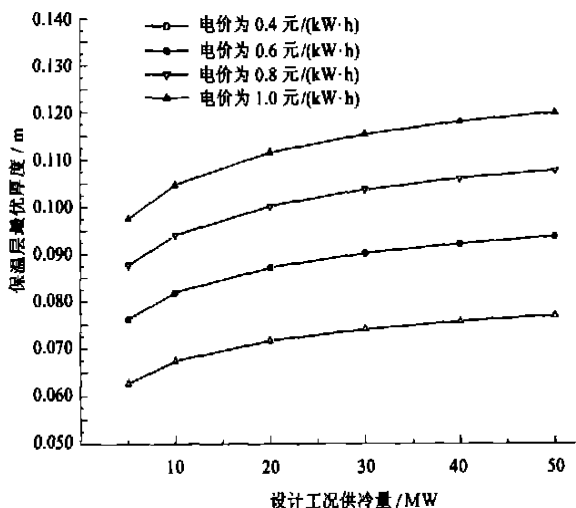


图 3 电价及冷负荷对保温层最优厚度的影响

Fig. 3 The effect of the electric power price and load ratio on the optimal insulation thickness

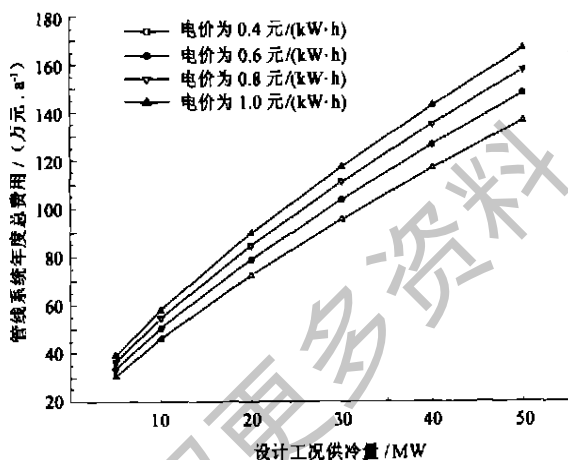


图 4 电价及冷负荷对管线系统年度总费用的影响

Fig. 4 The effect of the electric power price and load ratio on the annual total cost

从实例计算的结果图 1~4 和表 3 可以看出: 某一个具体的区域供冷系统, 在电价和设计冷负荷确定时, 存在一最优的设计工况的水流速度和保温层厚度, 设计的水流速度偏离最优流速, 会使系统的年度费用增加. 冷水输送距离对设计工况的最优水流速度和保温层最优厚度没有影响. 电价和设计冷负荷对设计工况的最优水流速度有显著影响, 电价升

高, 设计工况的最优水流速度降低; 设计冷负荷增大, 设计工况的最优水流速度增加. 电价对保温层的最优厚度有显著影响, 电价升高, 保温层的最优厚度增加; 设计冷负荷对保温层的最优厚度影响较小, 设计冷负荷增大, 保温层的最优厚度稍有增加.

### 3 结论

对某一个具体的区域供冷系统, 在电价和设计冷负荷确定时, 存在一个最优的设计工况的水流速度和保温层厚度. 冷水输送距离对最优水流速度和保温层最优厚度没有影响. 最优水流速度随电价升高而降低, 随设计冷负荷增大而升高. 保温层最优厚度随电价升高而增加, 随设计冷负荷的增大而稍有增加.

### 参考文献

- [1] Masatoshi S, Kosuke K, Ushiro S. Cooling load prediction in a district heating and cooling system through simplified robust filter and multilayered neural network [ J ]. Applied Artificial Intelligence, 2001, 15(7): 633—643.
- [2] Masatoshi S, Kosuke K, Ushiro S. Operational planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for mixed 0—1 linear programming [ J ]. European Journal of Operational Research, 2002, 137(3): 677—687.
- [3] 陈晓, 张国强, 文进希. 区域供冷系统中制冷机系统的优化配置探讨 [ J ]. 流体机械, 2003, 3(6): 55—61. Chen Xiao, Zhang Guo-qiang, Wen Jin-xi. Study on optimum scheme of chiller in district cooling system [ J ]. Fluid Machinery, 2003, 3(6): 55—61.
- [4] 姚平经. 全过程系统能量优化综合 [ M ]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995.
- [5] 李世武, 苏莫明. 热水管网布置的优化设计方法 [ J ]. 煤气与热力, 2003, 23(5): 271—275. Li Shi-wu, Su Mo-ming. Design method of optimizing layout and structure of hot-water heat-supply network. [ J ]. Gas & Heat, 2003, 23(5): 271—275.
- [6] 颜伟, 周孝清, 冀兆良. 广州地区典型年气象资料计算方法 [ J ]. 暖通空调, 2002, 32(3): 20—21. Yan Wei, Zhou Xiao-qing, Ji Zhao-liang. Formulation of the typical year climate data in Guangzhou [ J ]. Heating, Ventilating & Air Conditioning, 2002, 32(3): 20—21.

(下转第 35 页)

# A New Transaction Model and Transmission Congestion Management Method for the Power Market

Wu Guo-yue<sup>1</sup> Jiang Jin-liang<sup>1</sup> Wu Guo-pei<sup>2</sup> Hua Dong<sup>1</sup>

(1. College of Electric Power, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. Guangzhou Power Supply Branch, Guangzhou Power Group, Guangzhou 510245, Guangdong, China)

**Abstract:** The transaction model constitution and the transmission congestion management in the process of power transactions constitute a key issue in the normal operation of the power market. In this paper, by drawing on some overseas experiences and according to the specific conditions of China's reform of the power market at its earlier stage, a new transaction model and transmission congestion management method was proposed based on the investigation into the power market in Guangdong Province. In the congestion management, the corresponding least reduction of social benefit is taken into account and the cost of the congestion management is distributed in accordance with the load congestion dispatching factor. A numerical example was finally presented to prove the validity of the proposed method, which is of practical significance to the development of the power market, especially to the construction of electric networks.

**Key words:** power market; transaction model; transmission congestion management

(上接第 31 页)

# Optimized Design of the Chilled Water-conveying Pipeline in the District Cooling System

Liu Jin-ping<sup>1</sup> Du Yan-guo<sup>1</sup> Chen Zhi-qin<sup>2</sup>

(1. College of Electric Power, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. College of Industrial Equipment and Control Engineering, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** An optimized model to determine the optimal velocity of the chilled water and the optimal insulation thickness of the chilled water-conveying pipeline in the district cooling system was proposed, with the objective function of annual system cost which consists of: (1) the annual operating cost of the secondary pump for conveying the chilled water; (2) the cost due to the refrigeration loss of the chilled water-conveying pipeline; (3) the cost due to the temperature increase of the chilled water caused by the power consumption of the secondary pump; (4) the depreciation and maintenance cost of the secondary pump; and (5) the depreciation and maintenance cost of the chilled water-conveying pipeline. In the optimization, the character of the yearly-varied load was taken into account; the temperature difference between the feed water and the return water was assumed constant and the water flowrate was adjusted by the variable-frequency pump. By the calculation of a practical case, it is concluded that there is an optimal velocity of the chilled water and an optimal insulation thickness of the chilled water-conveying pipeline in the district cooling system, which are not affected by the conveying distance of the chilled water. It is also concluded that the optimal velocity of the chilled water decreases with the increase of the electric cost and the decrease of the designed cooling load, while the optimal insulation thickness of the pipeline increases with the increase of the electric cost and appreciably increases with the designed cooling load.

**Key words:** district cooling system; pipeline; optimized design; variable cooling load